

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 724 744

(21) N° d'enregistrement national : 94 11152

(51) Int Cl<sup>6</sup> : G 06 F 19/00, G 05 B 15/00 G 06 F 167:00

(12)

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 16.09.94.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : 22.03.96 Bulletin 96/12.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule.*

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés : DIVISION DEMANDÉE LE 15/09/95 BENÉFICIAIRE DE LA DATE DE DÉPÔT DU 16/09/94 DE LA DEMANDE INITIALE N° 94 11286 (ARTICLE L.612-4) DU CODE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(71) Demandeur(s) : ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE EN SYSTEMATIQUE APPLIQUÉE ADERSA — FR.

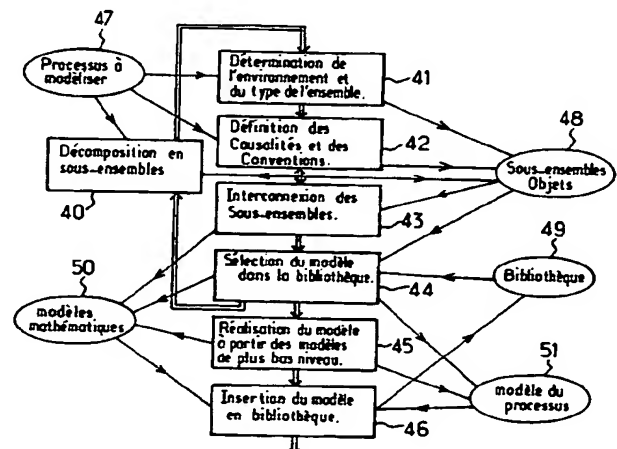
(72) Inventeur(s) : BRUNET JEAN, DESPLANS JEAN PIERRE, EL BAAMRANI HASSANE et NOEL OLIVIA.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire : CABINET MOUTARD.

### (54) PROCÉDE DE MODELISATION D'UN PROCESSUS PHYSIQUE.

(57) En vue d'automatiser la modélisation d'un processus physique à l'aide d'une représentation graphique de type schéma-bloc, le procédé selon l'invention comprend la constitution préalable d'une bibliothèque (49) d'objets physiques symbolisés par un bloc et des couples de ports d'entrée et sortie représentant les connexions de l'objet avec son environnement, chaque objet étant associé à plusieurs modèles mathématiques (50), la détermination (41) des connexions physiques du processus (47) avec son environnement, la décomposition (40) hiérarchique du processus (47) en objets physiques (48) se trouvant en bibliothèque (49), la définition (42) des interconnexions entre les ports desdits objets (48), pour chaque objet (48), la sélection d'un modèle mathématique (50) en bibliothèque (49) suivant la précision recherchée, et la constitution automatique (45) du modèle (51) du processus (47) à partir des modèles (50) sélectionnés et des connexions entre lesdits objets (48).



FR 2 724 744 - A1



PROCÉDÉ DE MODÉLISATION D'UN PROCESSUS PHYSIQUE.

La présente invention concerne un procédé de modélisation d'un processus physique à des fins d'analyse et de simulation.

Elle s'applique notamment, mais non exclusivement, à l'étude du comportement fonctionnel d'un processus physique dans son ensemble, à la définition des spécifications fonctionnelles des organes élémentaires intervenant dans le processus, de manière à obtenir un ensemble cohérent, ou encore, à l'évaluation des performances du processus, et à la définition et la validation des stratégies de commande du processus.

A l'heure actuelle, les modèles de processus physiques requièrent un investissement important pour leur développement. Par ailleurs, la spécificité et la rapide évolution des technologies font que ces modèles sont rarement réutilisables.

On a déjà proposé des logiciels de simulation et d'analyse de processus physiques utilisables dans divers domaines d'application basés sur l'un ou l'autre de deux langages graphiques principaux, à savoir, le langage schéma-bloc  
5 très utilisé par les automaticiens et le langage "bond-graph" ou multiportes mieux adapté à la description des processus physiques, mais utilisant un formalisme moins accessible.

10 Le langage schéma-bloc permet de représenter un système par un assemblage de blocs et de signaux d'interconnexions. Chaque bloc peut représenter n'importe quel type de modèle (localisé ou distribué, stabilisé ou dynamique). Cette  
15 représentation est généralement causale, c'est-à-dire que les différents blocs sont connectés entre eux par des liens de cause à effet, et elle décrit les entrées et les sorties de chaque bloc, c'est-à-dire le sens de résolution du calcul.

Ce langage n'impose pas de contraintes sur le type des  
20 variables manipulées, un bloc de  $n$  entrées et  $m$  sorties étant caractérisé par une relation constitutive explicite du type :

$$s(t) = f(e(t), t)$$

$e(t)$  étant les entrées et  $s(t)$  les sorties.

25

La construction d'un modèle graphique par schéma-bloc sans utiliser une méthodologie de développement s'avère longue et coûteuse pour des modèles complexes et présente de nombreux inconvénients.

30 Tout d'abord, les interconnexions entre les différents éléments n'ont pas de signification physique précise et évidente, et ce d'autant plus qu'il existe généralement une grande variété de variables de couplage. Cet inconvénient a pour effet d'empêcher d'obtenir des modèles réutilisables.

35

Par ailleurs, la structure de tels modèles graphiques étant causale, l'établissement d'un modèle graphique par schéma-bloc ne permet pas de mettre en évidence les conflits de

causalité, d'où une difficulté de maîtrise du modèle ainsi établi.

En outre, lors de la construction d'un modèle par schéma-  
5 bloc, le nombre de liens graphiques entre les différents  
éléments devient très vite inextricable, d'où une faible  
lisibilité et un risque d'erreur important.

Cependant, cette représentation présente l'avantage d'être  
10 simple d'utilisation et applicable à tous les domaines.  
Elle est donc très largement utilisée. Elle permet en outre  
de faire apparaître explicitement toutes les variables  
manipulées quelque soit leur nature.

15 Le langage multiportes se base sur la constatation qu'un  
système est composé de modules ou de composants dont les  
interactions énergétiques ou massiques avec le reste du  
système ont lieu à travers un nombre limité de connexions :  
entrées ou sorties de tuyaux, fils électriques, arbres  
20 mécaniques, etc ...

Selon ce langage, les emplacements des interconnexions sont  
appelés ports. Un système ayant plusieurs ports est donc  
appelé "multiportes".

Lorsque deux sous-systèmes sont reliés physiquement par une  
25 connexion mettant en contact leurs ports, les deux  
variables respectives d'effort et de flux des deux sous-  
systèmes sont égales. Ce langage présente l'avantage de  
refléter la structure physique de connexion du système et  
d'inclure les lois de conservation au niveau de chaque  
30 port.

La présente invention a pour but de cumuler les avantages  
de ces deux techniques de modélisation, c'est-à-dire  
d'utiliser les concepts généraux du langage multiportes  
35 (causalité, choix des variables d'état, conventions de  
signe, ...) en les adaptant, dans un souci de qualité, à la  
représentation schéma-bloc, qui fait l'objet d'outils  
logiciels de simulation du commerce.

A cet effet, elle propose un procédé de modélisation d'un processus physique pour simuler et analyser le fonctionnement dudit processus utilisant une représentation graphique de type schéma-bloc, ledit processus faisant intervenir des objets, des composants physiques ou des fonctions identifiables.

Ce procédé est caractérisé en ce qu'il comprend :

10

- la constitution préalable d'une bibliothèque d'objets physiques simples, classés selon les types suivants : résistif, capacitif, inertiel, transformateur et girateur, ou complexes obtenus par association d'objets simples, chaque objet étant symbolisé par une représentation graphique comprenant un bloc et au moins un couple de ports comportant un port d'entrée et un port de sortie mis en correspondance, symbolisant les connexions physiques de l'objet avec son environnement, par lequel transitent des flux physiques de matière ou de puissance, ou des informations, chaque objet étant en outre associé à au moins un modèle mathématique de base, simple ou complexe caractérisé par son degré de précision et sa bande de fréquences de validité,

25

- la détermination des connexions physiques par lesquelles transitent les flux physiques de matière ou de puissance, ainsi que les informations échangés par le processus avec l'environnement extérieur,

30

- la décomposition hiérarchique du processus en sous-ensembles physiques, puis en objets physiques se trouvant dans la bibliothèque,

35

- pour chacun des objets physiques composant le processus, la détermination de ses ports regroupant les variables de couplage avec les autres objets physiques constituant le

- 5 -

processus, avec les ports du processus ou du sous-ensemble de niveau supérieur,

- 5 - la représentation graphique de chaque objet physique  
composant le processus par un bloc et des ports, et la  
détermination de la causalité de chaque port et de la  
convention de signe de puissance définissant le sens  
positif conventionnel d'écoulement de la puissance dans  
chaque port de l'objet, indépendamment du contexte dans  
10 lequel il s'insère,
- la définition des interconnexions entre les ports des  
objets composant le processus et la résolution des  
conflits de convention de signe et de causalité, en  
15 tenant compte des conventions de signe et de la causalité  
du processus et celles de certains objets imposées par  
des considérations physiques,
- la sélection dans la bibliothèque de modèles de base  
20 compatibles en causalité, à affecter à chaque objet  
composant le processus en fonction du degré de précision  
à atteindre et de la bande de fréquences de validité, de  
manière à respecter les connections, les conventions de  
signe et les causalités précédemment établies, et  
25
- la constitution automatique du modèle mathématique du  
processus à partir des modèles des objets composant le  
processus, et des interconnexions entre les objets précé-  
demment établies.

30

Ce procédé permet de réaliser un modèle graphique hiérar-  
chisé qui constitue une image aussi fidèle que possible de  
la composition et de la structure technologique d'un  
processus, dont la modularité facilite l'évolution et la  
35 maintenance du modèle et en améliore la fiabilité.

Il permet de reporter la programmation des lois  
constitutives au plus bas niveau, c'est-à-dire au niveau

des noeuds terminaux de l'arbre de la décomposition hiérarchique, les niveaux supérieurs décrivant la structure de la décomposition hiérarchisée du processus. De cette manière, le concepteur du modèle choisit en dernier ressort les  
5 modèles appropriés aux objectifs de précision et de bande de fréquences de validité recherchés. Il peut ainsi substituer un ou plusieurs modèles des objets composant le processus par d'autres modèles compatibles, sans remettre en cause la structure de la décomposition hiérarchique et  
10 les connexions entre les objets.

Il permet de reporter au niveau macroscopique le problème de la causalité définissant le sens de résolution du calcul, c'est-à-dire, parmi toutes les variables identifiées pour un objet, quelles sont les variables d'entrée et  
15 les variables de sortie, ce problème étant le plus difficile à résoudre lors de la modélisation d'un processus.

En effet, le fait de reporter ce problème au niveau macroscopique, c'est-à-dire, au niveau du processus lui-même et  
20 des sous-ensembles physiques, permet d'une part, de limiter le nombre d'objets à prendre en considération, et d'autre part, de prendre en compte immédiatement la causalité imposée par certains de ces objets physiques. Il s'avère en effet que le problème de la causalité d'un processus  
25 présente une solution préférentielle ou obligatoire dans la plupart des cas.

A l'échelle microscopique, le problème de la causalité est déjà résolu du fait que l'on s'en remet à la bibliothèque.

30 Par ailleurs, ce procédé permet de réaliser un schéma-bloc présentant une structure modulaire et fonctionnelle dans laquelle les modèles de base représentent un ou plusieurs objets ou composants physiques. Il convient de noter que la structure hiérarchique globale d'un tel schéma est complètement découplée de la représentation locale des objets,  
35 c'est-à-dire des équations mathématiques décrivant ces objets. Il en résulte qu'un changement de modèle de base représentant un même objet physique ne remet pas en cause

le modèle global représentant le processus. Ainsi, la précision du modèle global peut être modifiée simplement en changeant la précision d'un ou plusieurs modèles de base.

- 5 Il convient de remarquer également que les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie doivent être vérifiées au niveau de chaque sous-ensemble, ce qui permet de contrôler la validité d'un modèle de base, et donc celle du modèle du processus. Ce  
10 procédé offre ainsi des facilités de test et de validation des modèles ainsi élaborés.

En outre, ce procédé permet d'exploiter au mieux le fait que ces modèles sont réutilisables en créant une biblio-  
15 thèque comprenant tous les modèles déjà réalisés et que l'on complète au fur et à mesure de la construction de nouveaux modèles. Il permet ainsi au réalisateur du modèle de concentrer son étude sur l'analyse globale du processus et de s'affranchir de la complexité du modèle mathématique  
20 décrivant le processus, celui-ci étant construit par étapes successives à partir de la présentation graphique établie par le réalisateur.

Un mode de réalisation du procédé selon l'invention sera  
25 décrit ci-après, à titre d'exemple non limitatif, avec référence aux dessins annexés dans lesquels :

La figure 1 représente schématiquement un calcu-  
lateur mettant en oeuvre le procédé selon  
30 l'invention ;

La figure 2 est une représentation schématique de l'enchaînement des étapes du procédé selon l'invention ;

La figure 3 représente schématiquement un exemple  
35 d'un processus que l'on cherche à modéliser ;

- 8 -

Les figures 4 et 5 sont des représentations graphiques du modèle du processus obtenues par le procédé selon l'invention ;

5 Les figures 6 et 7 sont des représentations graphiques des sous-ensembles constituant le processus à modéliser ;

Les figures 8 et 9 montrent deux représentations différentes d'un même processus ;

10 Les figures 10 et 11 montrent les représentations graphiques, respectivement générique et détaillée, d'un sous-ensemble du processus à modéliser.

Le procédé selon l'invention est mis en oeuvre par un ordinateur du type de celui représenté figure 1, comprenant une unité centrale 1 à base de processeurs et de  
15 mémoires, des organes de commande tel qu'un clavier 3 et une souris 4, un écran de visualisation 2, et une unité de mémoire de masse 5 pour stocker notamment une bibliothèque comprenant des modèles unitaires et des modèles de processus plus complexes déjà réalisés.

20 La figure 3 représente un exemple de processus physique que l'on peut modéliser grâce au procédé selon l'invention. Ce processus physique est un moteur de type thermique comprenant un papillon des gaz 31, un collecteur d'admission 32,  
25 un moteur thermique 33 qui entraîne un arbre de transmission 35, un dispositif d'injection de carburant 34, un collecteur d'échappement 36 et un dispositif d'échappement 37.

30 Les gaz arrivent en entrée du papillon des gaz 31 à une pression  $P_1$  et une température  $T_1$ . Ils ont un débit massique  $m_1$  et un débit enthalpique  $m_1.h_1$ . Les gaz en sortie du papillon des gaz 31 sont envoyés au moteur thermique 33 par l'intermédiaire du collecteur d'admission

32 à la sortie duquel agit le dispositif d'injection de carburant 34. Lorsque le moteur thermique 33 est alimenté et en fonctionnement, il applique un couple 38 à l'arbre de transmission 35 et émet des gaz d'échappement qui traversent successivement le collecteur d'échappement 36 et le dispositif d'échappement 37. Les gaz en sortie du dispositif d'échappement 37 ont une pression  $P_4$ , une température  $T_4$  un débit massique  $m_4$  et un débit enthalpique  $m_4.h_4$ .

Un tel moteur peut être symbolisé grâce au procédé selon l'invention par un bloc rectangulaire 10 et des flèches entrantes 11a,12a,13a,14a alignées respectivement avec des flèches sortantes 11b,12b,13b,14b s'appliquant sur deux bords opposés 15,16 du bloc 10 (figure 4), que l'on peut faire apparaître à l'écran de visualisation 2 grâce à des commandes appropriées introduites au moyen des touches du clavier 3 ou à l'aide de la souris 4. Chaque couple de flèches alignées représente un port du processus à modéliser.

20

Tel que représenté figure 2, la première étape 41 du procédé selon l'invention consiste à définir et à décrire ces ports.

Ces ports peuvent être de type physique ou informationnel et correspondent aux liens du processus avec son environnement extérieur. Chaque port associant une entrée à une sortie, est décomposé en un couple effort / flux ou pseudo effort / pseudo flux de variables scalaires ou vectorielles. Les ports physiques peuvent être de nature électrique, mécanique, thermodynamique, hydraulique, etc ... Ils transmettent de l'énergie, de la masse ou de la quantité de mouvement, tandis que les ports de type informationnel transmettent de l'information et ont une puissance négligeable.

35

Ainsi, sur la figure 4, le moteur thermique 10 comprend deux ports thermodynamiques 11a,11b et 12a,12b de type pseudo effort / pseudo flux, représentant respectivement

l'admission des gaz de l'extérieur et l'échappement des gaz vers l'extérieur.

Les vecteurs d'effort ont pour composantes en entrée 11a et 12a, la pression  $P_1$ , respectivement  $P_4$ , la température  $T_1$ ,  
5 respectivement  $T_4$ , et les fractions massiques des constituants des gaz  $X_{11}$  et  $X_{12}$ , respectivement  $X_{41}$  et  $X_{42}$ . Par ailleurs, les vecteurs de flux en sortie 11b et 12b ont pour composantes le débit massique total  $m_1$ , respectivement  $m_4$ , le débit massique des constituants des gaz  $m_{11}$  et  $m_{12}$ ,  
10 respectivement  $m_{41}$  et  $m_{42}$ , et la puissance enthalpique  $m_1.h_1$ , respectivement  $m_4.h_4$ .

Le moteur thermique 10 comprend également un port mécanique 13a, 13b associant un couple  $C_{mot}$  en sortie à une vitesse de  
15 rotation  $w_{mot}$  en entrée, correspondant au transfert de puissance vers l'arbre de transmission 5.

Il comprend en outre un port informationnel 14a, 14b comportant un port d'entrée 14a recevant l'angle  $\theta$  d'ouverture du papillon des gaz 31, auquel on a associé un port de sortie  
20 fictif 14b pour conserver la symétrie.

Dans ce schéma, l'injection de carburant est supposée être une source interne, si bien que le port correspondant est interne.

25 Au cours de la seconde étape 42 du procédé, on affecte des causalités aux ports 11 à 14. Cette opération consiste à choisir parmi les variables associées aux ports, les entrées et les sorties du calcul. Or, d'après le principe  
30 de la causalité en modélisation dynamique, si l'effort est en entrée, le flux correspondant se trouve en sortie et vice versa.

Cette étape 42 consiste donc également à associer à chaque port, soit une causalité de type effort (flux en entrée et effort en sortie), soit une causalité de type flux (effort en entrée et flux en sortie). Cette causalité est symbolisée sur le schéma par des flèches entrantes ou sortantes  
35

- 11 -

entre les variables du port et le bloc 10 symbolisant le processus.

Au niveau du processus physique à modéliser, la causalité  
5 des ports est déterminée par des considérations physiques.  
Ainsi, le port mécanique 13 est affecté à une causalité de  
type effort, du fait que le moteur thermique est une source  
de couple, modulée par la vitesse  $w_{\text{mot}}$  de l'arbre de trans-  
mission 35. Il serait en effet un non sens de calculer la  
10 vitesse à partir du couple. C'est pourquoi la vitesse  
figure en entrée du calcul et le couple en sortie.

En ce qui concerne les ports thermodynamiques 11,12, on  
choisit une causalité de type flux car ils sont reliés à  
15 l'atmosphère ambiante qui se comporte comme une source  
d'effort.

Pour définir complètement les ports, il convient également  
d'affecter arbitrairement une convention de signe à chaque  
20 port (à l'exception des ports de type informationnel) pour  
indiquer le sens de la puissance, de la masse ou de la  
quantité de mouvement.

Une convention positive signifie que les quantités sont  
positives si elles sont reçues ou appliquées à l'objet  
25 modélisé, et négatives dans le cas contraire. A l'inverse,  
une convention négative signifie que les quantités sont  
positives si elles sont fournies par l'objet modélisé à son  
environnement, et négatives dans le cas contraire.

Cette convention s'applique aux variables d'effort dans le  
30 domaine de la mécanique où la loi de l'action et de la  
réaction s'applique, et aux variables de flux dans les  
autres domaines, où les lois de continuité s'appliquent  
(convention + si le débit est fourni à l'élément en  
mécanique des fluides par exemple).

35 Cette convention est établie sur la base de considérations  
liées à la physique ou à l'usage.

Ainsi, sur la figure 5, on a affecté une convention de signe positive (+) au premier port thermodynamique 11 et une convention négative (-) au second port thermodynamique 12 car le flux moyen s'écoule du premier port vers le second.

Une convention de signe négative (-) est appliquée au port mécanique 13 du fait que le couple  $C_{mot}$  représente le couple fourni par le moteur à la transmission.

Une fois que l'environnement du processus à modéliser est entièrement défini, il s'agit à la seconde étape 42 du procédé de résoudre les conflits de causalités. Or, comme à ce stade d'avancement de la modélisation, on se trouve en présence d'un seul ensemble 10, aucun problème de ce type ne se pose et l'on passe à l'étape suivante 43. A cette étape 43, l'opérateur va rechercher si le modèle correspondant à l'ensemble se trouve déjà dans une bibliothèque 49 stockée dans la mémoire de masse 5, en fonction du type de modèle choisi. Si tel n'est pas le cas ou si aucun modèle n'a été choisi, on passe à l'étape 40 qui consiste à décomposer l'ensemble 47 à modéliser, c'est-à-dire, le processus physique en sous-ensembles 48 en fonction des caractéristiques physiques du processus.

Ainsi, le moteur décrit précédemment peut se décomposer, en se référant à sa structure physique représentée figure 3, en six sous-ensembles principaux, à savoir :

- un papillon des gaz 31,
- un collecteur d'admission 32,
- un bloc moteur 33,
- un collecteur d'échappement 36,
- un dispositif de détente 37, et
- un dispositif d'injection de carburant 34.

35

Il convient ensuite de représenter chaque sous-ensemble 48 à l'aide d'un bloc et des ports en procédant de la même manière que pour le processus physique. C'est pourquoi, le

calculateur exécute à nouveau les premières étapes 41 à 43 pour chaque sous-ensemble 48 que l'on a identifié.

5 Lorsque cela est possible, ou lorsqu'on estime que l'on est arrivé à un niveau de détail suffisant, on peut à cette étape sélectionner un modèle représentant le sous-ensemble considéré.

10 Pour cela, on distingue cinq types de modèles élémentaires stockés dans la bibliothèque 49.

Un premier type R de modèle élémentaire qui peut être qualifié de résistif, est dissipatif d'énergie et est associé à aucun état. Il peut être associé à une causalité de type résistance, conductance ou mixte.

15 Un second type C de modèle élémentaire, qualifié de capacitif, stocke de l'énergie potentielle en modifiant ses états qui sont associés à des variables de déplacement. Il est régi par des équations différentielles dont la résolution  
20 correspond à une causalité de type intégrale, dérivée ou mixte.

Un troisième type I qualifié d'inertiel, emmagasine de l'énergie cinétique en modifiant ses états qui sont  
25 associés à des variables de moment. Les modèles de ce type sont également régis par des équations différentielles dont la résolution correspond à une causalité de type intégrale, dérivée ou mixte.

30 Les modèles élémentaires des deux autres types transforment l'énergie tout en la conservant. Ce sont les transformateurs TF et les girateurs GY.

Dans l'exemple précédent, le papillon des gaz 31 peut être  
35 assimilé à un élément de type résistif R modulé par l'angle d'ouverture  $\theta$  du papillon.

Le collecteur d'admission 32 est équivalent à un élément capacitif C.

Le bloc moteur 33 est équivalent au niveau macroscopique à un transformateur TF complexe puisque sa fonction est de transformer l'énergie thermodynamique en énergie mécanique. Au niveau microscopique, il peut être modélisé par une association de modèles de type R, C, I et TF.

Le collecteur d'échappement 36 est modélisé par un élément de type capacitif C, tandis que le dispositif de détente 37 est assimilé à un élément résistif R. Quant au dispositif d'injection de carburant 34, il est équivalent à une source de débit de carburant liquide ou vapeur. De ce fait, il ne comporte qu'un seul port.

A la première étape 41, on définit les ports de chaque sous-ensemble 48 précédemment identifié, de la même manière que les ports du processus physique à modéliser. Puis, au cours de la seconde étape 42, lorsque tous les sous-ensembles 48 d'un même niveau hiérarchique ont été définis, il s'agit d'affecter une causalité à chaque sous-ensemble et d'introduire les conventions choisies.

Cette étape 42 revient à réaliser une fiche signalétique pour chaque sous-ensemble précédemment identifié en association avec l'étape 43 qui réalise l'interconnexion des sous-ensembles et qui consiste à interconnecter les symboles représentant chaque sous-ensemble 48, en fonction de leurs caractéristiques respectives définies précédemment. Pour cela, le calculateur 1 cherche à connecter chaque port à un autre port associé aux mêmes variables. Cette opération permet d'obtenir le schéma-bloc représenté figure 6, dans lequel les blocs rectangulaires 61 à 66 symbolisant les sous-ensembles 48 sont reliés les uns aux autres par leurs ports de manière à former une chaîne présentant certaines analogies avec la représentation de la figure 3.

Ainsi, sur cette figure 6, le bloc "papillon des gaz" 61 est connecté au bloc "collecteur d'admission" 62. Le bloc "collecteur d'admission" 62 est relié à la source

- 15 -

"injection" 66 et au bloc "bloc moteur" 63, lequel est connecté au bloc "collecteur d'échappement" 64. Enfin, le bloc "collecteur d'échappement" 64 est connecté au bloc "détente" 66.

5

La fiche signalétique de chaque sous-ensemble réalisée au cours de l'étape 42 contient les informations suivantes :

10 - le type du sous-ensemble, R, C, I, TF, GY, ou association d'éléments simples,

- la causalité des ports,

15 - la convention de signe + ou - affectée au sens d'écoulement de la masse, de la quantité de mouvement ou de la puissance, dans chaque port du sous-ensemble,

20 - l'indication si la programmation du modèle prévoit ou non la réversibilité du flux de matière dans les ports du sous-ensemble,

25 - la définition de la base de référence sur laquelle les variables vectorielles doivent être projetées, ou les valeurs de référence dans le cas de variables scalaires.

25

La réalisation de cette fiche signalétique pour chaque objet physique permet d'assurer le découplage entre les modèles locaux et le modèle global du niveau hiérarchique supérieur, et d'avoir une approche "objet", indépendante du  
30 contexte dans lequel le sous-ensemble doit s'insérer.

L'affectation de la causalité est effectuée par le calculateur ou l'opérateur par une approche hiérarchique descendante qui prend en compte les contraintes imposées par le  
35 niveau supérieur, lesquelles n'offrent que peu de degrés de liberté sur les choix de causalité, en vérifiant que les causalités affectées à deux objets à interconnecter sont compatibles.

Pour cela, le calculateur ou l'opérateur commence tout d'abord par affecter aux sous-ensembles concernés, les causalités imposées par l'environnement du niveau supérieur, c'est-à-dire, dans le cas présent, du processus à modéliser. Ainsi, dans l'exemple étudié, la causalité associée aux ports thermodynamiques 11,12 de type flux implique que la causalité du papillon 31 des gaz et du dispositif de détente 37 soient de même type. Ce qui correspond à une causalité de type conductance dans le cas de modèles élémentaires résistifs R.

Par ailleurs, certains modèles ont une causalité unique qui ne dépend pas du processus dans lequel ils sont insérés. C'est le cas d'une source de flux comme le dispositif d'injection de carburant 34 qui a une causalité de type flux.

L'opérateur poursuit si nécessaire cette opération en affectant ensuite les causalités préférentielles attachées à certains sous-ensembles par prise en compte de considérations d'usage liées au métier concerné ou de considérations numériques liées à la représentation interne choisie du sous-ensemble. Ainsi, dans le cas de modèles élémentaires capacitifs ou inertiels par exemple, on préfère en général la causalité intégrale qui correspond respectivement à une causalité de type effort ou flux, à la causalité dérivée.

Il suffit ensuite de propager les causalités aux autres sous-ensembles pour lesquels plusieurs choix sont acceptables, sachant que deux sous-ensembles sont compatibles en causalité si l'un est en causalité effort et l'autre en causalité flux ou inversement.

Dans le cas où l'on aboutit à des conflits de causalité, il convient, soit de modifier les causalités préférentielles, soit d'ajouter des éléments de connexion supplémentaires entre les modules de manière à rétablir la cohérence.

Ainsi, tel que représenté figure 6, le papillon des gaz 31 et le dispositif de détente 37 sont en causalité de type

conductance ou flux, les collecteurs d'admission 32 et d'échappement 36 en causalité de type intégrale ou effort, et le bloc moteur 63 en causalité de type flux pour les ports thermodynamiques et effort pour le port mécanique.

5

Comme pour la définition des ports du processus, l'opération suivante consiste à affecter à chaque port physique de chaque sous-ensemble une convention de signe, en tenant compte des conventions de signe choisies pour les ports de l'ensemble de niveau hiérarchique supérieur, c'est-à-dire, du processus dans le cas présent, et en prenant soin de choisir pour deux ports interconnectés des conventions de signe compatibles. Ainsi, les ports de deux sous-ensembles sont compatibles si les conventions affectées respectivement à ces deux ports sont de signes contraires.

10  
15

Cette opération permet d'aboutir à la représentation de la figure 6 ou 7 dans laquelle chaque port des sous-ensembles est associé à un signe (+) ou (-).

Si l'on se trouve en présence de conventions de signe incompatibles sur deux ports à connecter, il faut soit interposer le signe - sur le fil reliant les efforts dans le domaine de la mécanique, ou sur le fil reliant les flux dans les autres domaines, soit modifier les conventions de signe affectées à ces deux ports.

20  
25

Il s'agit de déterminer ensuite si chaque sous-ensemble est à flux réversible ou non, car dans un modèle dynamique, il peut se produire des inversions de flux locales et on ne connaît pas toujours le sens du flux à chaque instant.

30

Ainsi, dans l'exemple étudié, seuls les sous-ensembles "bloc moteur" 63 et "injection" 66 ne sont pas à flux réversible.

La non réversibilité du sous-ensemble "bloc moteur" provient du fait que l'on se trouve en présence d'un objet complexe et donc que son modèle réduit ne s'applique qu'à des valeurs moyennes.

35

Afin d'éviter d'aboutir à des singularités lors de la résolution du calcul du modèle mathématique global, il est en général préférable d'utiliser des modèles à flux réversibles, ce qui implique une certaine redondance dans les vecteurs d'effort et de flux.

Lorsque l'on a affaire à des variables vectorielles ou à certaines variables scalaires, il est nécessaire de définir les repères de référence sur lesquels sont projetés les vecteurs, ou de définir des valeurs de référence, comme par exemple, dans le cas de tensions électriques ou de pressions.

A l'issue de l'étape 43, on obtient une représentation graphique dans laquelle les ports des sous-ensembles d'un même niveau hiérarchique sont parfaitement définis et sont interconnectés.

Il convient de noter que les liens entre les blocs symbolisant les sous-ensembles sont toujours appliqués sur les bords des blocs parallèles à la direction générale D de connexion. En respectant cette règle, on obtient un schéma-bloc horizontal comme sur la figure 6, vertical ou croisé comme sur la figure 7.

Tel que représenté figure 7, la structure graphique de ce mode de représentation peut refléter la topologie de la structure physique du processus à modéliser représenté figure 3.

La figure 8 montre un autre exemple d'une représentation schéma-bloc croisée dans laquelle on a assemblé le moteur thermique 10 tel que décomposé figure 6, aux éléments mécaniques d'un véhicule à moteur. Ainsi, le "bloc moteur" 63 assure l'entraînement d'une charge 80 constituant le véhicule par l'intermédiaire d'une transmission 70 modélisée par les éléments suivants :

- l'inertie du moteur 71,
- un embrayage et une boîte de vitesse 72, et
- un arbre de transmission 73.

5

Dans ce schéma, on a placé les sous-ensembles 61 à 66 du domaine thermodynamique horizontalement, et les sous-ensembles 71,72,73 et 80 du domaine mécanique verticalement, le sous-ensemble "bloc moteur" 63 assurant l'échange  
10 entre ces deux parties. Cette représentation offre l'avantage de bien différencier les domaines physiques mis en oeuvre par le processus à modéliser.

En outre, il convient de remarquer sur les figures 6 à 8  
15 que les croisements de liens sont réduits. Ces croisements de liens peuvent être évités en adoptant une hiérarchisation appropriée. Ainsi, la figure 9 représente les interconnexions entre le moteur thermique 10 et la charge 80 couplée au moteur grâce à la transmission 70. Ce mode de  
20 représentation permet d'aboutir à un diagramme clair et synthétique.

L'étape suivante 44 consiste à ce stade d'avancement de la réalisation du modèle, pour chaque objet ou sous-ensemble  
25 48 précédemment décrit, soit à sélectionner en bibliothèque 49, un modèle mathématique de base en fonction de l'objectif recherché en termes de précision et de bande de fréquences, et en fonction de la causalité précédemment établie, soit à le décomposer en objets physiques plus fins  
30 (étape 40).

A cet effet, la bibliothèque 49 stockée sous la forme d'une base de données dans l'unité de mémoire de masse 5 comprend les éléments suivants pour chaque objet qu'elle contient :

35

- le symbole graphique de l'objet sous la forme d'un bloc et des ports appliqués au bloc, définissant les variables

- 20 -

correspondant aux ports, la causalité des ports et la convention de signe utilisée,

- 5 - pour chaque modèle mathématique associé décrivant l'objet, la représentation graphique sous la forme d'un schéma-bloc standardisé de la structure interne du modèle, celle-ci étant indépendante du domaine physique concerné, et
- 10 - pour chaque modèle, la fonction mathématique constitutive caractéristique de l'objet représenté par le modèle sous une forme paramétrée dans le cas d'un modèle générique.

15 Grâce à l'application des principes de l'analogie entre les différents domaines de la physique, la structure interne des modèles génériques est indépendante du milieu physique, seules les lois constitutives et la signification des variables physiques étant spécifiques du domaine concerné.

20 Cette approche permet d'obtenir un découplage entre la structure générique et le spécifique d'une application qui est décrit dans des sous-programmes interchangeables.

Ainsi, comme représenté sur la figure 10, le collecteur  
25 d'admission 32, qui est assimilé à un modèle capacitif à trois ports 21 à 23 de type vectoriel en causalité intégrale, est représenté en bibliothèque de manière générique par un bloc 20 dans lequel les vecteurs de flux en entrée  $F_1, F_2, F_3$  à quatre composantes, sont traités par  
30 quatre sommateurs 25 à 28 qui additionnent les composantes de même rang extraites par des opérateurs  $U(1), U(2), U(3), U(4)$ , en tenant compte des conventions de signe affectées aux ports. Les valeurs délivrées par les sommateurs 25 à 28 sont ensuite traitées par des intégrateurs  $1/s$ , puis,  
35 par la fonction mathématique constitutive  $\Phi_C^{-1}$  du modèle, avant d'être envoyées en sortie E par l'intermédiaire un multiplexeur MUX.

Il convient de remarquer que la fonction mathématique constitutive peut être linéaire ou non et est spécifique du domaine physique concerné.

- 5 A partir de cette étape 44, il suffit de particulariser le modèle générique pour obtenir le modèle mathématique de l'objet physique, comme par exemple celui représenté figure 11. Cette opération consiste à définir la fonction mathématique constitutive  $\Phi_C^{-1}$  modélisant l'état thermodynamique  
10 (pression, température, composition) du gaz dans le volume du collecteur d'admission 31, à partir des caractéristiques des flux entrant et sortant, sachant qu'un tel dispositif agit à volume constant, c'est-à-dire sans échange de travail avec l'extérieur.

15

- Il est à noter que pour décrire un même objet, il existe une infinité de modèles qui dépendent de la précision que l'on cherche à obtenir et de la bande de fréquences que l'on cherche à étudier. Parmi toutes les représentations  
20 possibles, on choisira celles qui sont le mieux adaptées à la bande de fréquences désirée et qui sont compatibles avec la causalité retenue au niveau supérieur.

Ainsi, par exemple, un bloc moteur peut être modélisé :

25

- par une représentation du fonctionnement en régime quasi-stabilisé ; les relations sont alors algébriques et il n'y a pas d'éléments dynamiques, excepté des retards purs dus au transport, ou bien

30

- par une représentation détaillée microscopique modélisant les n cylindres du moteur et le fonctionnement de chaque cylindre à l'aide d'un modèle complexe composé d'éléments R,C,I,TF,... des domaines thermique, mécanique, thermody-  
35 namique, ...

Si l'on désire affiner davantage la modélisation de l'objet en décomposant un ou plusieurs objets 48, on exécute à

nouveau l'étape de décomposition 40 et les étapes 41 à 44 visant à définir chaque sous-ensemble issu de cette décomposition. Bien entendu, cette opération peut être répétée autant de fois que l'on désire.

5

Lorsque tous les sous-ensembles 48 sont associés à un modèle mathématique 50, le procédé selon l'invention se poursuit par une étape 45 au cours de laquelle l'unité centrale 1 élabore le modèle mathématique 51 du processus à partir des modèles 50 des sous-ensembles 48 et du schéma de connexion entre les sous-ensembles (figure 6) et des informations issues de l'étape 44 de sélection des modèles des objets physiques.

15 L'étape d'insertion 46 des modèles en bibliothèque 49 consiste à insérer tous les modèles qui ont été construits lors des étapes précédentes, à savoir, les modèles de base obtenus en assemblant d'autres modèles de base 50 et le modèle du processus 51.

20

Au préalable, les modèles ainsi réalisés sont testés et validés séparément, les lois de conservation de masse d'énergie et de quantité de mouvement étant applicables au niveau de chaque objet.

25 Le modèle du processus ainsi obtenu peut donc être testé et validé facilement, chaque sous-ensemble et chaque niveau hiérarchique pouvant être testé et validé séparément. Le procédé selon l'invention permet ainsi de maîtriser la complexité, ce qui rend plus aisée la réalisation de  
30 modèles complexes fiables.

## REVENDECATIONS

1. Procédé de modélisation d'un processus physique pour simuler et analyser le fonctionnement dudit processus en utilisant une représentation graphique de type schéma-bloc, ledit processus (47) faisant intervenir des objets (31 à 37), des composants physiques ou des fonctions identifiables, caractérisé en ce qu'il comprend :
- 10 - la constitution préalable d'une bibliothèque (49) d'objets physiques simples, classés selon les types suivants : résistif, capacitif, inertiel, transformateur et girateur, ou complexes obtenus par association d'objets simples, chaque objet étant symbolisé par une
  - 15 représentation graphique comprenant un bloc (20) et au moins un couple de ports (21 à 23) comportant un port d'entrée (21a à 23a) et un port de sortie (21b à 23b) mis en correspondance, symbolisant les connexions physiques de l'objet avec son environnement, par lequel transitent
  - 20 des flux physiques de matière ou de puissance, ou des informations, chaque objet étant en outre associé à au moins un modèle mathématique de base, simple ou complexe caractérisé par son degré de précision et sa bande de fréquences de validité,
  - 25 - la détermination (41) des connexions physiques (11 à 14) par lesquelles transitent les flux physiques de matière ou de puissance, ainsi que les informations échangés par le processus (47) avec l'environnement extérieur,
  - la décomposition (40) hiérarchique du processus (47) en
  - 30 sous-ensembles physiques (48), puis en objets physiques se trouvant dans la bibliothèque (49),
  - pour chacun des objets (48) physiques composant le processus (47), la détermination de ses ports regroupant les variables de couplage avec les autres objets
  - 35 physiques (48) constituant le processus (47), avec les ports du processus ou du sous-ensemble (48) de niveau supérieur,

- la représentation graphique de chaque objet physique (48) composant le processus (47) par un bloc (61 à 66) et des ports, et la détermination de la causalité de chaque port et de la convention de signe de puissance ((+) ou (-))  
5 définissant le sens positif conventionnel d'écoulement de la puissance dans chaque port de l'objet (48), indépendamment du contexte dans lequel il s'insère,
- la définition (44) des interconnexions entre les ports des objets (48) composant le processus (47) et la résolution des conflits de convention de signe et de causalité,  
10 en tenant compte des conventions de signe et de la causalité du processus (47) et celles de certains objets imposées par des considérations physiques,
- la sélection dans la bibliothèque (49) de modèles de base  
15 (50) compatibles en causalité, à affecter à chaque objet (48) composant le processus (47), en fonction du degré de précision à atteindre et de la bande de fréquences de validité, de manière à respecter les connections, les conventions de signe et les causalités précédemment  
20 établies, et
- la constitution automatique (45) du modèle mathématique (51) du processus (47) à partir des modèles de base (50) des objets (48) composant le processus, et des interconnexions entre les objets précédemment établies.

25

2. Procédé selon la revendication 1,  
caractérisé en ce qu'il comprend l'entrée en bibliothèque  
(49) des modèles de base (50) de chaque objet ou phénomène  
physique et du modèle (51) du processus (47) ainsi détermi-  
30 nés.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2,  
caractérisé en ce qu'il comprend la vérification et la  
validation du modèle mathématique (51) ainsi obtenu, par  
35 application des lois de conservation de masse, d'énergie et  
de quantité de mouvement au niveau de chaque objet (48)  
constituant le processus (47).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes,  
caractérisé en ce que la résolution des conflits de causalité est effectuée par une approche hiérarchique descendante, en tenant compte tout d'abord de la causalité de l'ensemble de niveau supérieur, puis des causalités de certains objets (48) imposées par des considérations physiques, et enfin des causalités préférentielles, les causalités ainsi définies étant ensuite propagées aux sous-ensembles pour lesquels plusieurs choix sont acceptables.

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes,  
caractérisé en ce que la bibliothèque (49) comprend les éléments suivants pour chaque objet qu'elle contient :

- le symbole graphique de l'objet sous la forme d'un bloc (20) et des ports (21 à 23) appliqués au bloc (20), définissant les variables correspondant aux ports, la causalité des ports et la convention de signe utilisée ((+) ou (-)),
- au moins un modèle mathématique associé à une représentation graphique sous la forme d'un schéma-bloc de la structure du modèle, et
- pour chaque modèle, la fonction mathématique constitutive ( $\Phi_C^{-1}$ ) modélisant l'état physique de l'objet représenté par le modèle.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes,  
caractérisé en ce que l'élaboration (43) des modèles mathématiques (50) des sous-ensembles (48) comprend la sélection en bibliothèque (49) d'un modèle mathématique par objet constituant le sous-ensemble en tenant compte de la nature des ports du sous-ensemble (48), de leur causalité, de la convention de signe choisie et du type de modèle choisi, et la définition de la fonction mathématique constitutive ( $\Phi_C^{-1}$ ) du modèle.

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes,  
caractérisé en ce qu'il comprend, lors de l'interconnexion  
(44) des sous-ensembles (48), la réalisation d'un schéma-  
5 bloc dans lequel les symboles de type bloc (61 à 66) représentant les sous-ensembles (48) sont interconnectés par leurs ports de manière à relier chaque port à un autre port associé aux mêmes variables.

10 8. Procédé selon l'une des revendications précédentes,  
caractérisé en ce que chaque ensemble ou sous-ensemble (48) est symbolisé par un bloc rectangulaire (10), chacun de ses ports physiques et informationnels étant symbolisé par une  
15 flèche entrante (11a à 14a) et une flèche sortante (11b à 14b) alignées et appliquées respectivement sur deux bords opposés (15,16) du bloc (10).

9. Procédé selon la revendication 8,  
20 caractérisé en ce que les symboles (61 à 66) de type bloc représentant les sous-ensembles (48) issus d'une décomposition d'un ensemble sont disposés les uns par rapport aux autres et reliés de manière à ce que les flèches représentant les ports soient appliquées sur les bords des blocs  
25 qui sont parallèles à une même direction (D).

10. Procédé selon la revendication 8 ou 9,  
caractérisé en ce que les symboles (61 à 66) de type bloc représentant les objets physiques (48) issus d'une décomposition d'un ensemble sont alignés les uns par rapport aux  
30 autres

11. Procédé selon la revendication 8 ou 9,  
caractérisé en ce que les symboles (61 à 66) de type bloc  
35 représentant les objets physiques (48) issus d'une décomposition d'un ensemble sont disposés les uns par rapport aux autres de manière à refléter la topologie de la structure physique dudit ensemble.

12. Procédé selon l'une des revendications précédentes,  
caractérisé en ce que la définition d'un objet physique  
5 comprend en outre :
- la définition de son type, simple (R,C,I,TF,GY) ou complexe,
  - l'indication si son modèle mathématique a prévu ou non la réversibilité du flux de matière dans ses ports,
  - 10 - la définition d'une base de référence sur laquelle les variables de couplage de type vectoriel doivent être projetées, ou de valeurs de référence dans le cas de variables scalaires.

1/6

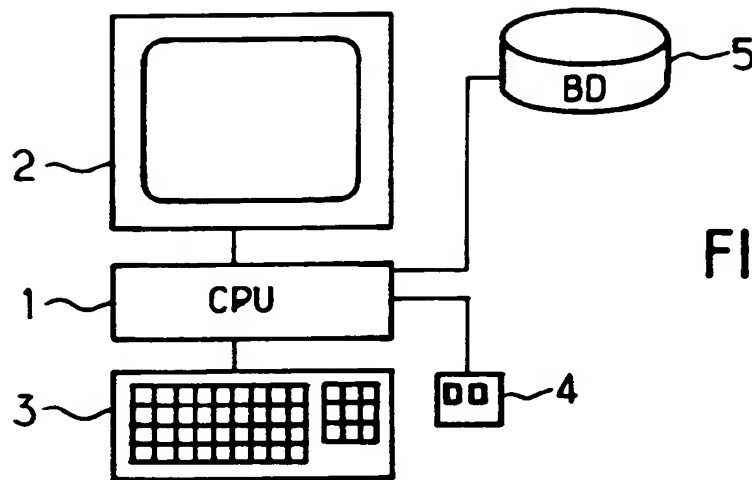


FIG. 1

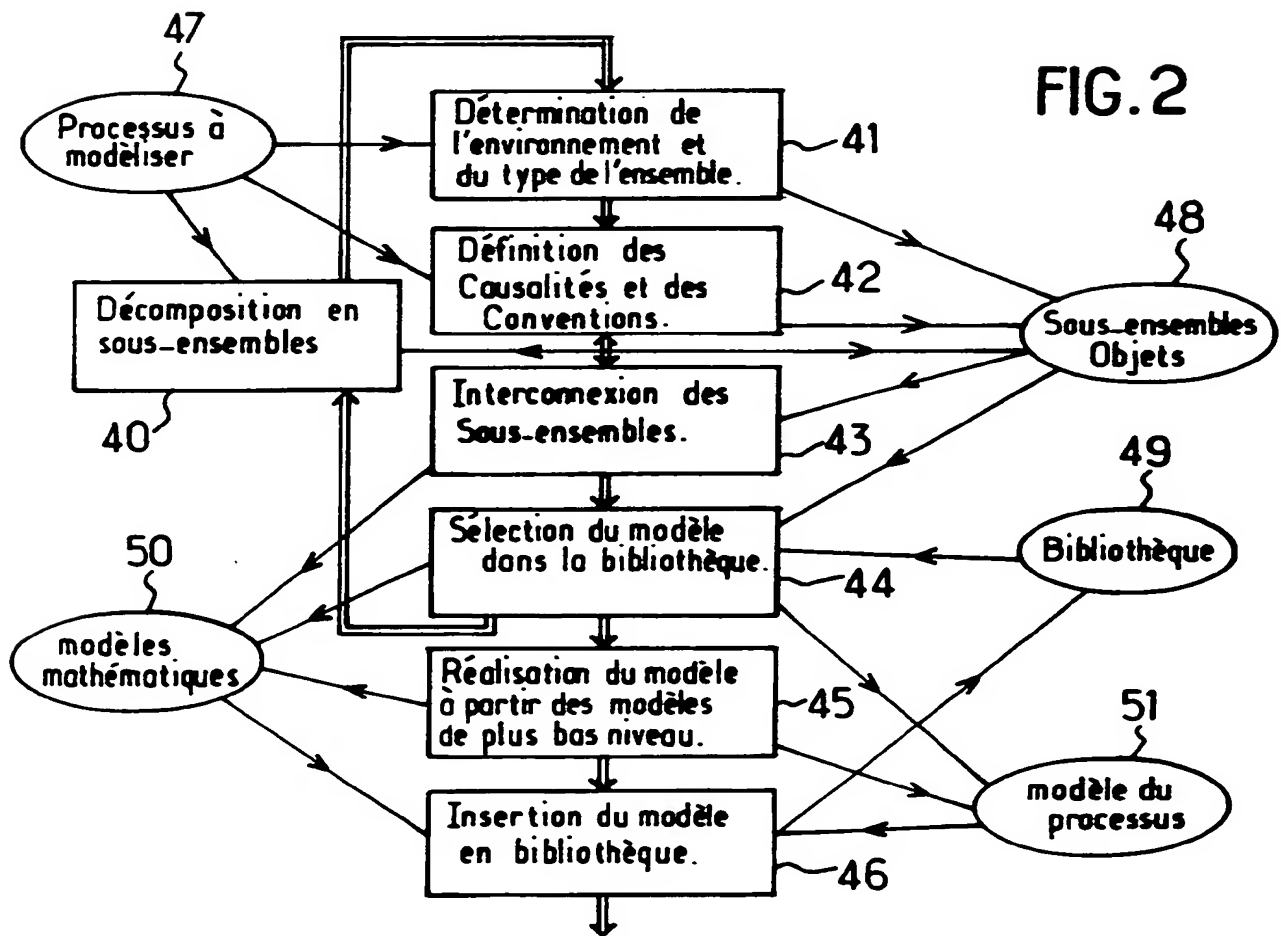
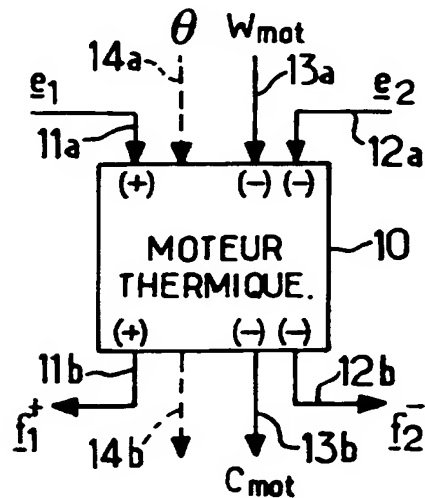
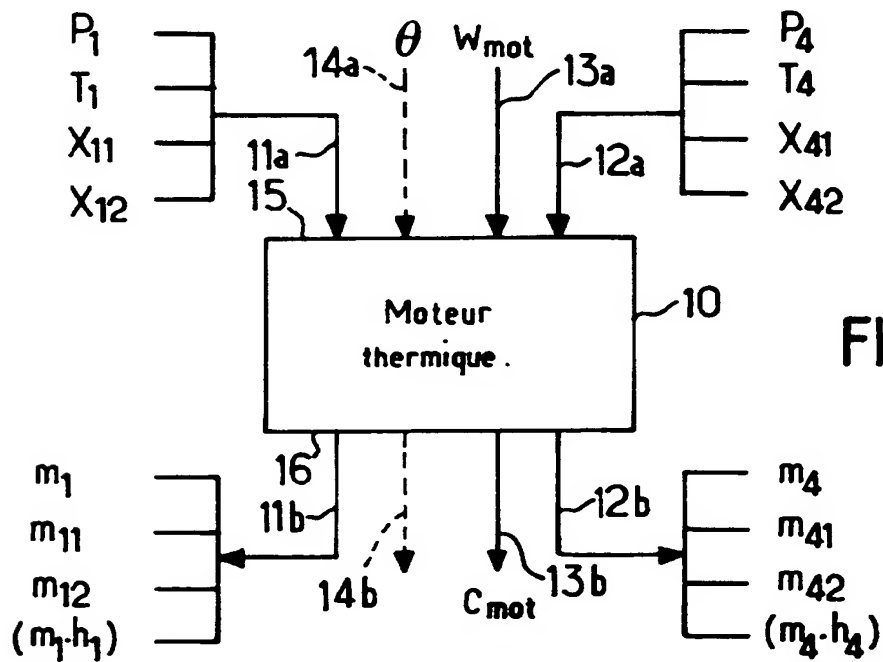
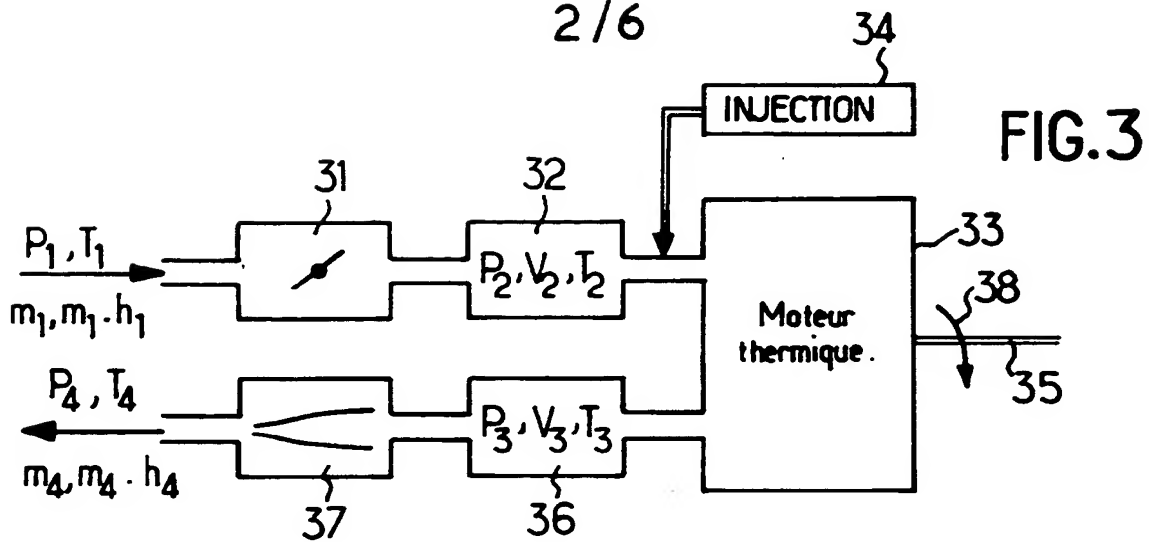
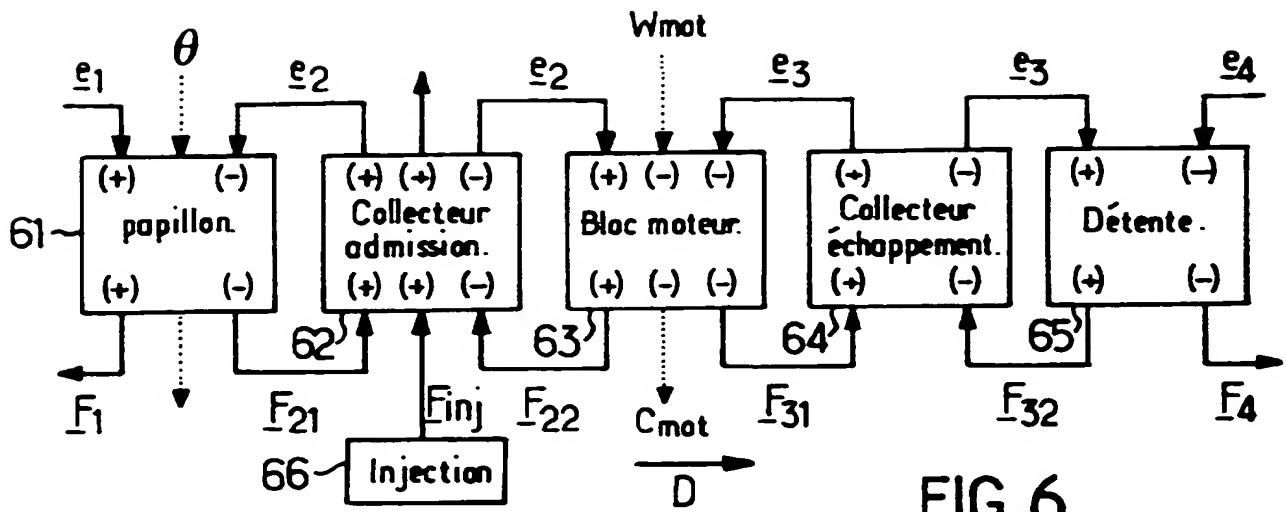


FIG. 2

2/6





**FIG. 6**

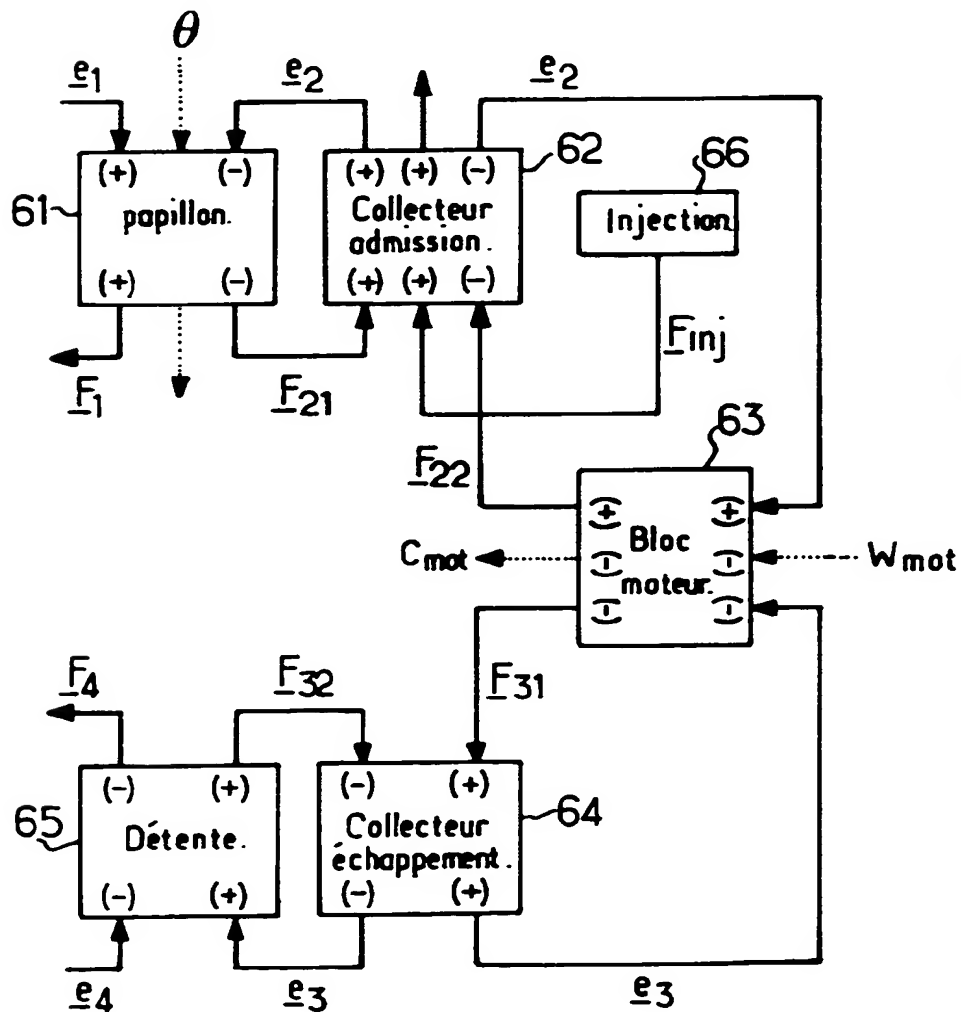


FIG. 7

4/6

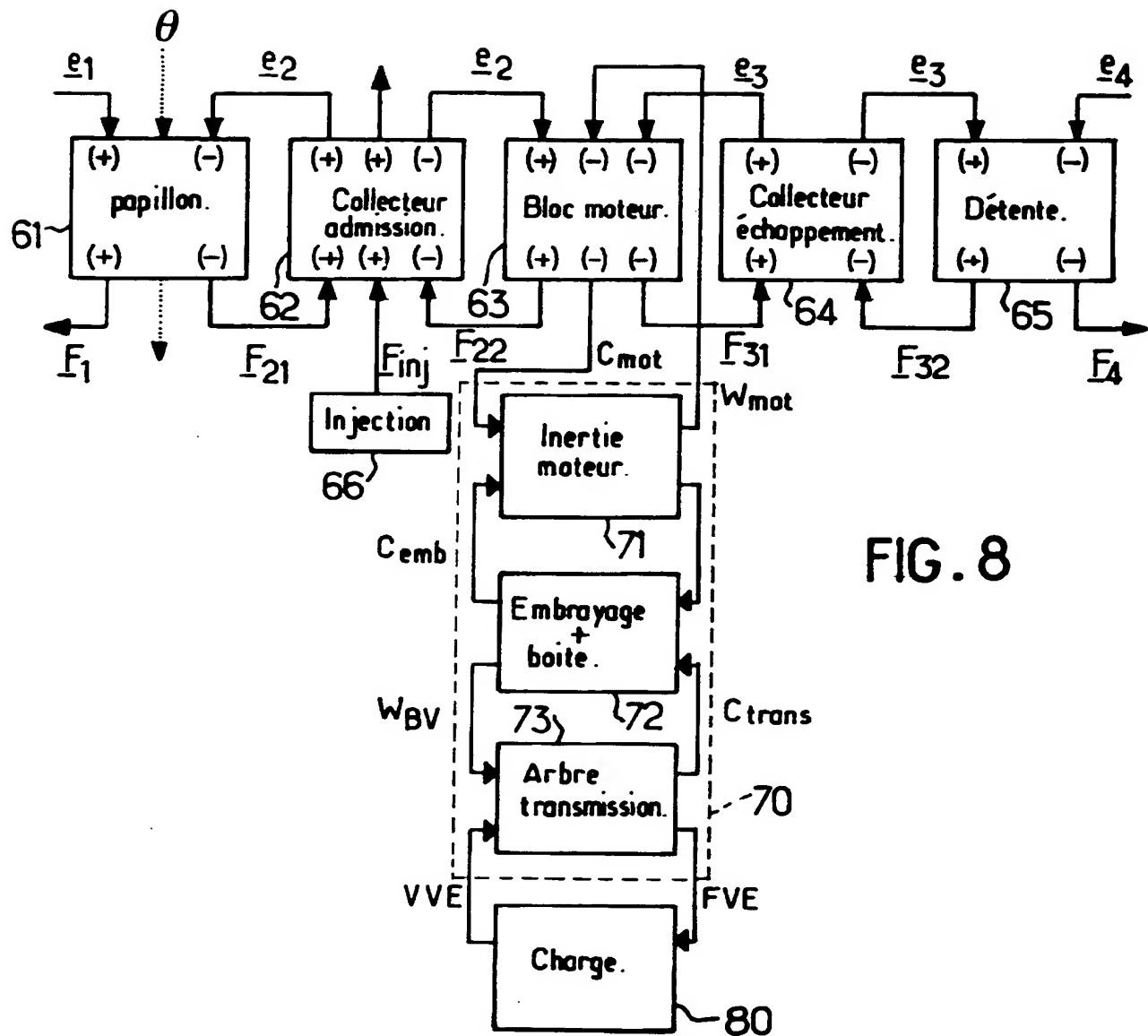


FIG. 8

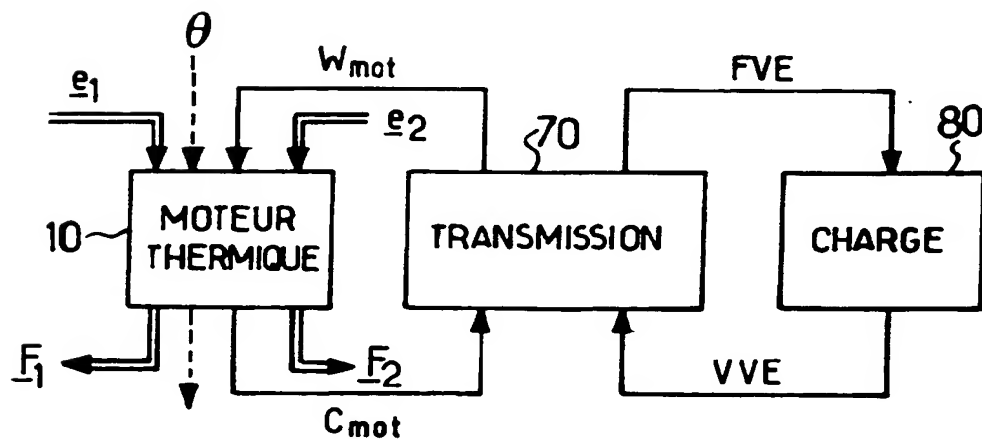
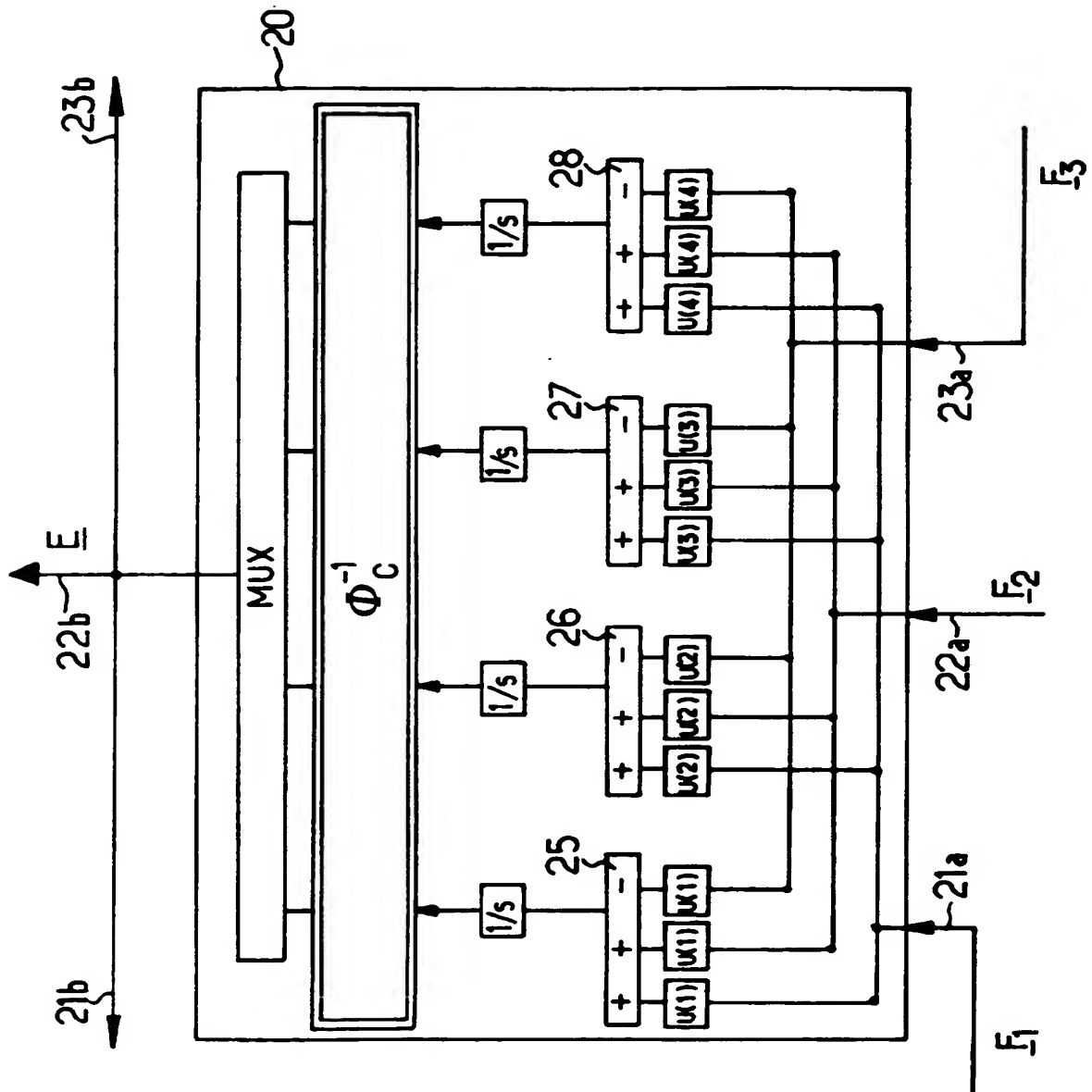


FIG. 9

FIG. 10



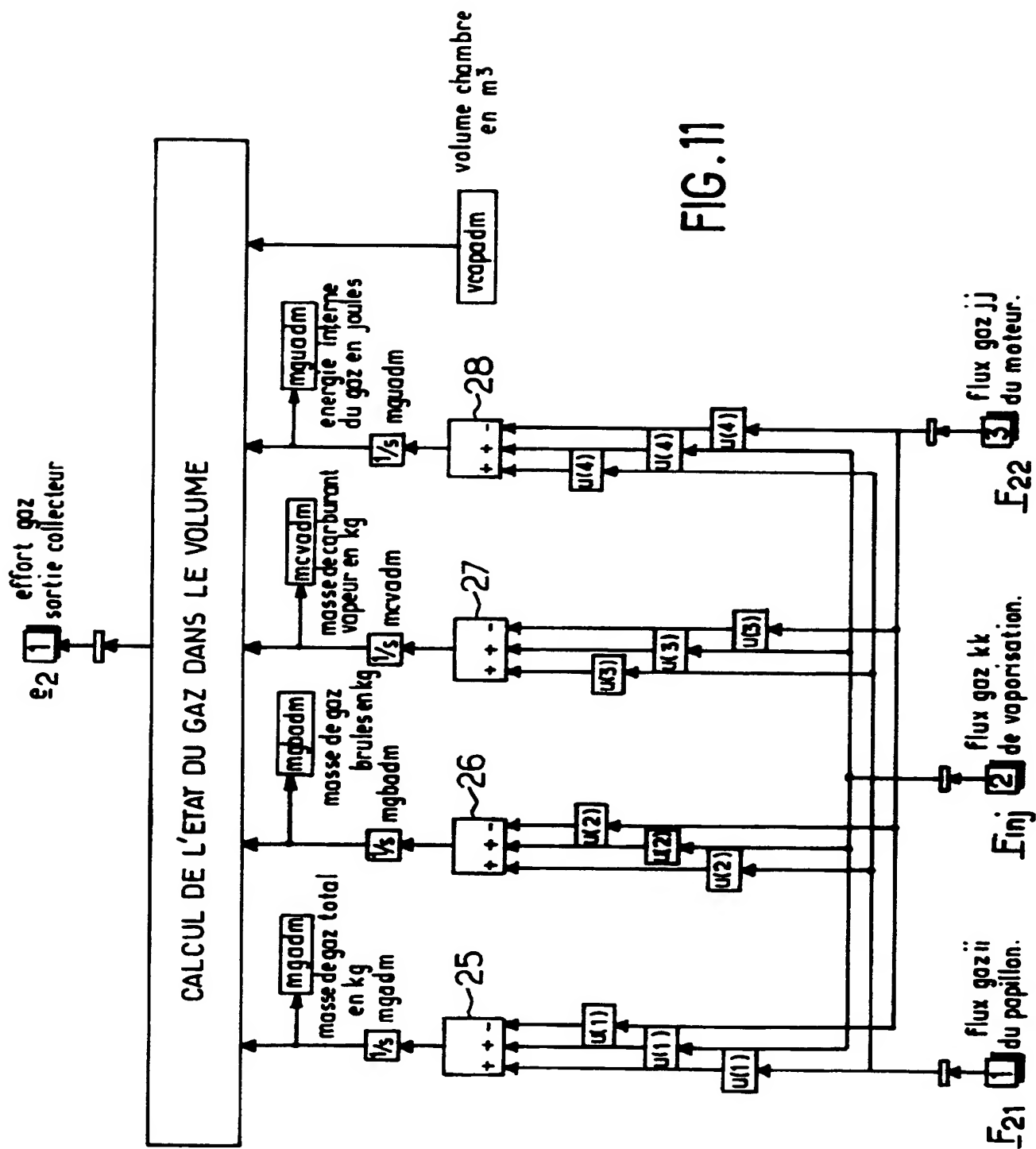


FIG.11

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	COMPUTER AIDED DESIGN, vol.21, no.9, 21 Novembre 1989, LONDON GB pages 584 - 588 HOOD ET AL 'automating physical system modelling using bond graphs' * le document en entier *	1-11
A	US-A-5 092 780 (VLACH) 3 Mars 1992 * colonne 2, ligne 6 - colonne 5, ligne 28; figures 1-3 *	1
A	MEASUREMENT AND CONTROL, vol.27, no.6, Juillet 1994, LONDON GB pages 185 - 194 PIKE ET AL 'simulation tools for the 90s' * page 186, colonne 1, ligne 29 - page 188, colonne 1, ligne 41 *	1
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. CL.6)
		G06F G05B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
23 Mai 1995		Guingale, A
<p><b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b></p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons A : membre de la même famille, document correspondant</p>		

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**